

## ESTUDOS DE RESSONÂNCIA NA BACIA DO TERMINAL XXI DO PORTO DE SINES

R. Capitão<sup>1</sup>, M.G. Neves<sup>1</sup>, C.J.E.M. Fortes<sup>1</sup>, L. Pinheiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC  
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa  
[rcapitao@lnec.pt](mailto:rcapitao@lnec.pt), [mgneves@lnec.pt](mailto:mgneves@lnec.pt), [jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt), [lpinheiro@lnec.pt](mailto:lpinheiro@lnec.pt)

## RESUMO

Nos últimos anos, têm sido realizados no LNEC estudos de ressonância na bacia portuária do Terminal XXI do porto de Sines. Estes estudos incluem a análise das ondas de longo período e estudos em modelo numérico.

Para o estudo das ondas de longo período, analisaram-se as séries temporais de registos de um marégrafo colocado na bacia do Terminal XXI e os dados recolhidos pela boia-ondógrafo direcional do largo de Sines. O estudo em modelo numérico, realizado com o modelo DREAMS, envolveu a caracterização da forma de oscilação ressonante da bacia portuária, a atual e as de diferentes soluções para a extensão do cais do Terminal XXI, e a comparação dos resultados com dados medidos *in situ*, para situações em que houve registo de ressonância no interior do porto.

No artigo são apresentados o ponto de situação do estudo de análise das ondas de longo período na bacia portuária do Terminal XXI e os resultados da análise das características de ressonância dessa bacia para a geometria portuária correspondente à situação em que foram efetuadas as medições no marégrafo, e são discutidos esses resultados, quando confrontados com os problemas de ressonância ora identificados.

## 1. INTRODUÇÃO

No âmbito do Plano de Expansão do Terminal XXI do porto de Sines, o quebra-mar leste está a ser objeto de ampliações de modo a melhorar a atual proteção marítima do Terminal XXI. A Administração do Porto de Sines (APS) é a entidade promotora da Empreitada “2.<sup>a</sup> Fase de Ampliação do Quebra-mar Leste do Porto de Sines”, adjudicada à firma CONDURIL - Construtora Duriense, S. A..

A análise das ondas de longo período na bacia portuária do Terminal XXI, assim como a análise das características de ressonância dessa bacia, quer para a geometria atual da bacia, quer para as resultantes das diferentes soluções de extensão do cais do referido terminal e do quebra-mar leste, envolveu os seguintes trabalhos da responsabilidade do LNEC:

- A análise das características das ondas de longo período ao largo de Sines, com base em dados medidos na boia-ondógrafo direcional ao largo do Porto de Sines durante algumas situações de agitação marítima, anteriores a 2011, para as quais se verificaram fenómenos ressonantes na bacia atual;
- A análise das características das ondas de longo período no interior da bacia portuária em estudo e das respetivas características ao largo de Sines, com base em dados medidos na boia-ondógrafo direcional ao largo do Porto de Sines e em dados provenientes de um marégrafo instalado no interior da bacia portuária em estudo, durante algumas situações de agitação marítima para as quais se verificaram fenómenos ressonantes na bacia atual durante o decorrer do estudo.
- O estudo, em modelo numérico, de caracterização da forma de oscilação ressonante da bacia portuária atual e de mais três configurações resultantes de diferentes soluções para a extensão do cais do Terminal XXI e do quebra-mar leste;
- A análise conjunta de dados *in-situ* e resultados numéricos.

Esses trabalhos tiveram como base as configurações da bacia portuária do Terminal XXI, fornecidas pela APS, e os dados do marégrafo e da boia de Sines para o período de abril de 2011 a junho de 2012, fornecidos pelo Instituto Hidrográfico (IH).

Nas seções seguintes, descrevem-se apenas os estudos realizados para uma das configurações da bacia portuária, a configuração correspondente à situação em que se dispõe de medições no marégrafo (de abril de 2011 a junho de 2012).

## 2. Zona de estudo e metodologia empregue

### *O Porto de Sines e o seu Terminal XXI*

O porto de Sines está situado na costa ocidental sul de Portugal Continental. A bacia do Terminal de Contentores, designado por Terminal XXI, situa-se na zona mais a Sul do porto e é protegida da agitação incidente pelo quebra-mar leste, Figura 1.



Figura 1 - Porto de Sines e Terminal XXI.

A geometria das obras que constituía a configuração da bacia do Terminal XXI em fevereiro de 2011 é a que se apresenta na Figura 2 a). A bacia portuária do Terminal XXI era abrigada por um quebra-mar, com cerca de 1100 m de comprimento. Junto à cabeça do quebra-mar, as profundidades variavam entre 18 e 20 m, aproximadamente. A bacia abrigada por este quebra-mar tinha profundidades que variavam entre 1 e 21 m, aproximadamente. No interior da bacia, o cais acostável do Terminal XXI tinha 380 m de comprimento.

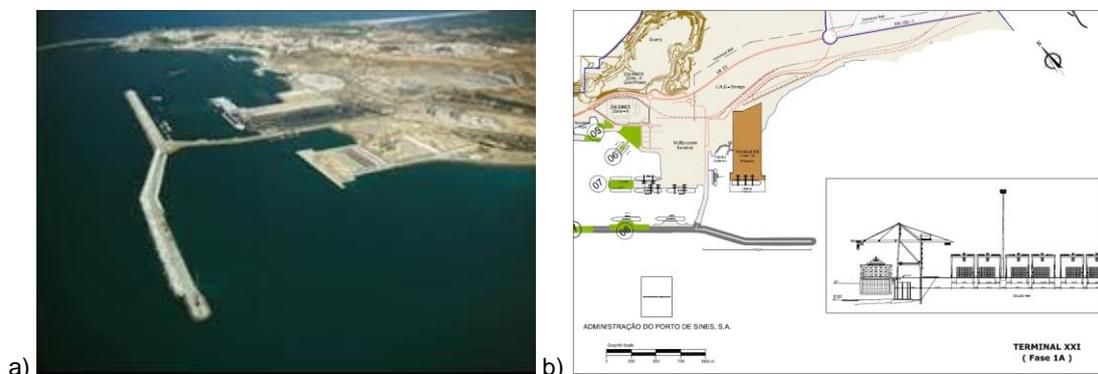


Figura 2 - Configuração do Terminal XXI, em fevereiro de 2011. Desenho fornecido pela APS.

De fevereiro a dezembro de 2011, foram realizadas obras no Terminal XXI pela CONDURIL, o que levou a uma nova configuração da bacia do Terminal XXI, Figura 3.

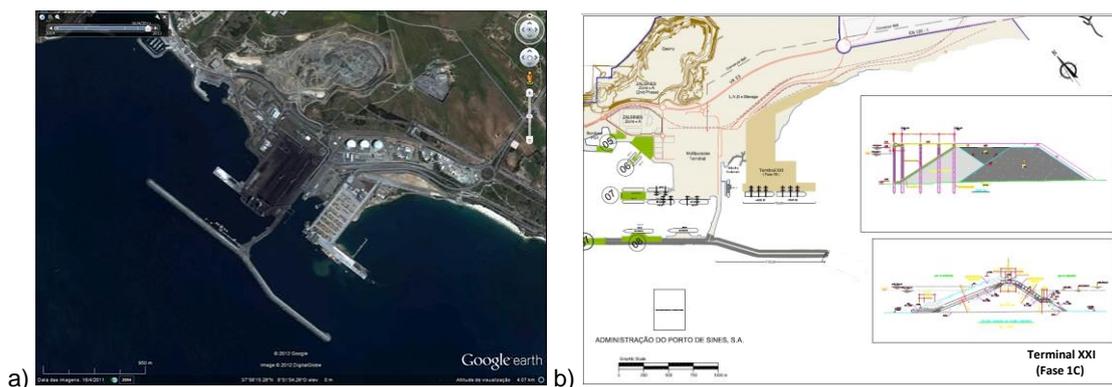


Figura 3 - Configuração do Terminal XXI, em maio de 2011. Imagem (Google Earth©) e desenho da configuração (APS).

Finalmente, em março de 2013, e findos os trabalhos de construção, a configuração do Terminal é a apresentada na Figura 4.

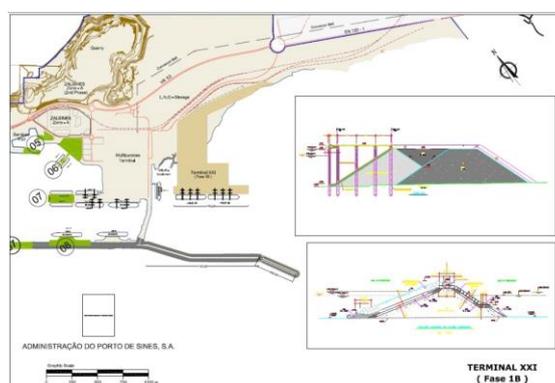


Figura 4 - Configuração do Terminal XXI, em março de 2013. Desenho da configuração (APS).

Nesta bacia, são frequentes os relatos de agitação significativa observada no seu interior que induzem movimentos excessivos nos navios amarrados ao cais, o que motivou os estudos de ondas longas solicitados ao LNEC.

### ***Metodologia empregue***

De modo a estudar a resposta da bacia à ação de ondas longas e melhorar o conhecimento local dos fenómenos de ressonância, foram usados e analisados os dados obtidos com um marégrafo instalado pelo IH na bacia portuária, para um conjunto representativo de episódios ressonantes.

Por outro lado, foram também determinados os períodos de oscilação próprios da bacia, usando o modelo numérico DREAMS, Fortes *et al.* (2012) e Neves *et al.* (2013). Para analisar o fenómeno de ressonância dentro da bacia com este modelo numérico, considerou-se uma extensa gama de períodos de ondas, de modo a caracterizar as curvas de resposta da bacia (o que reflete a variação da altura das ondas num dado ponto, dependente do período de oscilação).

Finalmente, para reproduzir numericamente os dias em que foram registados problemas de ressonância no Terminal XXI, foram identificadas as correspondentes gamas de períodos de pico de ondas longas nos dados do marégrafo e fizeram-se cálculos suplementares também com o modelo DREAMS. A comparação de resultados numéricos com os dados do marégrafo para esses dias, permitiu avaliar o desempenho deste modelo numérico.

### 3. Análise das medições *in situ*

Nesta secção apresenta-se a análise, realizada até ao momento, das características das ondas de longo período no interior da bacia portuária em estudo com base nos dados provenientes do marégrafo instalado no interior da bacia portuária em estudo e nas características da agitação obtidas com a boia ondógrafo direcional ao largo de Sines, durante as situações (devidamente identificadas) para as quais se verificaram problemas nos navios amarrados na bacia atual, suspeitas de estarem associadas a fenómenos ressonantes.

#### **Dados existentes**

O marégrafo encontra-se instalado no interior do Terminal XXI e é composto por um sensor de pressão hidrostática acoplado a um registador (*datalogger*), que regista o nível da água a cada 1 segundo (ver Figura 5). Este marégrafo recolhe dados desde final de março de 2011 e existem registos válidos a partir de 8 de abril de 2011. Aqui, analisam-se os dados recolhidos entre 22 de dezembro de 2011 e 20 de junho de 2012.



Figura 5 - Localização do marégrafo instalado no Terminal XXI do Porto de Sines (fonte: IH).

Estes dados foram tratados e processados pelo IH e separados nas seguintes componentes de ondas: a) componente de agitação marítima (períodos das ondas até 32 s); b) componente de ondas longas (períodos entre 32 s e 8192 s - 2 h e 18 m) e c) componente de maré (períodos superiores a 8192 s).

No período em análise (de 22 de dezembro de 2011 a 20 de junho de 2012), foram assinaladas pela PSA Sines – Terminal de Contentores S.A. (PSA) três ocorrências de problemas nos navios que atracaram no Terminal XXI (3 de janeiro, 25 de fevereiro e 3 de março de 2012), não se registando, porém, quaisquer temporais na boia de Sines nesses dias.

No período em que houve medições no marégrafo, isto é, entre abril de 2011 e junho de 2012, registou-se, na boia de Sines, a ocorrência de temporais (associados a registos com  $H_s > 5$  m) nos dias 24 e 27 de outubro de 2011; e 3, 4 e 22 de novembro de 2011.

Estas condições de temporal seriam, segundo os técnicos da PSA, as mais gravosas para as manobras de atracagem dos navios no Terminal XXI.

É de notar que, durante este período, a bacia do porto sofreu uma série de mudanças geométricas (alterações de configuração), devidas a obras marítimas em curso, que incluíram as ampliações do cais e do quebra-mar.

#### **Análise descritiva dos dados existentes**

Para as datas em que houve sinalização de problemas na bacia do Terminal XXI, que constam do Quadro 1, apresentam-se as características das ondas de curto período (alturas de onda significativa,  $H_{s\_oc}$ , e períodos médio e de pico,  $T_{z\_oc}$  e  $T_{p\_oc}$ ) e de ondas longas ( $H_{s\_ol}$  e  $T_{p\_ol}$ ), obtidas a partir dos dados recolhidos pelo marégrafo instalado no Terminal XXI. É de referir que entre 19 de novembro e 22 de dezembro de 2011 não há dados do marégrafo.

Quadro 1 - Condições de agitação verificadas na boia e no marégrafo instalado no Terminal XXI, para os eventos em que ocorreram problemas na bacia portuárias e em que ocorreu temporal entre abril de 2011 e junho de 2012.

Data	Observação	Marégrafo				
		Hs <sub>oc</sub> (m)	Tz <sub>oc</sub> (s)	Tp <sub>oc</sub> (s)	Hs <sub>ol</sub> (m)	Tp <sub>ol</sub> (s)
23-10-2011	Navio a mexer	0.16	4.2	7.5	0.06	671.7
24-10-2011	Temporal e navio a mexer	0.24	4.4	8.3	0.08	649.6
25-10-2011	Navio a mexer	0.27	3.8	11.3	0.09	149.5
27-10-2011	Temporal e navio a mexer	0.27	4.0	9.3	0.12	153.2
28-10-2011	Navio a mexer	0.15	3.7	9.9	0.06	726.1
29-10-2011	Navio a mexer	0.13	6.2	17.8	0.10	659.5
30-10-2011	Navio a mexer e cabos partidos	0.18	6.6	17.6	0.19	157.7
31-10-2011	Cabos partidos	0.23	3.8	15.4	0.10	617.1
03-11-2011	Temporal e cabos partidos	0.26	7.1	17.8	0.27	159.4
04-11-2011	Temporal e cabos partidos	0.23	5.4	16.2	0.16	159.1
03-01-2012	Cabos Partidos	0.09	5.2	16.7	0.04	682.6
25-02-2012	Cabos Partidos	0.22	4.0	15.6	0.09	177.4
03-03-2012	Cabos Partidos	0.21	3.9	15.2	0.08	168.1

Verificou-se ainda, como é referido em Fortes *et al.*, 2012, que as direções de agitação situavam-se dentro da gama W-NW, para a qual foi referido haver problemas ressonantes no interior da bacia. Os dias em que houve problemas no terminal nem sempre coincidem com situações de temporal: apenas o temporal de 3 e 4 de novembro de 2011 coincidiu com dias em que ocorreu “registro de cabos partidos” e os temporais de 24 e 27 de outubro coincidiram com os dias em que ocorreu “navio a mexer devido a ondulação”. A partir de novembro de 2011, embora haja referências a situações de cabos partidos, não foram registados temporais na boia ao largo de Sines.

Para os casos estudados, as alturas de onda associadas a ondas longas são relevantes (entre 0.04 m e 0.27 m) e os valores mais elevados destas nem sempre coincidem com os períodos de temporal. Por outro lado, não se observou uma relação clara entre alturas significativas de ondas curtas e longas. Os períodos de pico associados a ondas longas pertencem a duas gamas distintas (150 a 177 s e 617 a 726 s).

Da análise das condições dos dias sem problemas operacionais, pode verificar-se que as alturas significativas das ondas curtas e longas são bastante menores do que as observadas nos dias em que houve relato de problemas na bacia. No entanto, os períodos de pico para estas duas condições são idênticos, não havendo diferenças assinaláveis, apesar de as gamas de períodos com mais energia se estreitarem muito para os dias assinalados com problemas.

### ***Análise dos dados existentes com recurso a wavelets***

De modo a aprofundar a análise descritiva já efetuada, relacionando as características das ondas curtas medidas ao largo com as das ondas longas medidas no interior da bacia, efetuou-se um estudo com recurso a *wavelets*, de modo a analisar a evolução temporal dos espectros

dos sinais medidos quer no marégrafo quer na boia. Porém, dado que não se dispunha das séries temporais medidas na boia ao largo de Sines restringiu-se a análise aos dados existentes no marégrafo.

Na Figura 6, com exemplo, apresenta-se o espectro de energia sob a forma de *wavelet* calculado para 22 de outubro de 2011, dia em que ocorreu um temporal em Sines mas em que a PSA não registou nem movimentos excessivos nos navios amarrados nem rotura de cabos no Terminal XXI. Como se pode observar, os períodos a que corresponde a maior energia estão à volta de 675 s, observando-se, ainda, períodos com alguma energia nos períodos em redor de 60 s. É de notar que, para o período de pico de 675 s a bacia oscila como “um todo”, não se verificando, ao longo do cais, nós que poderiam gerar movimentos indesejáveis de navios aí amarrados (configuração 1B).

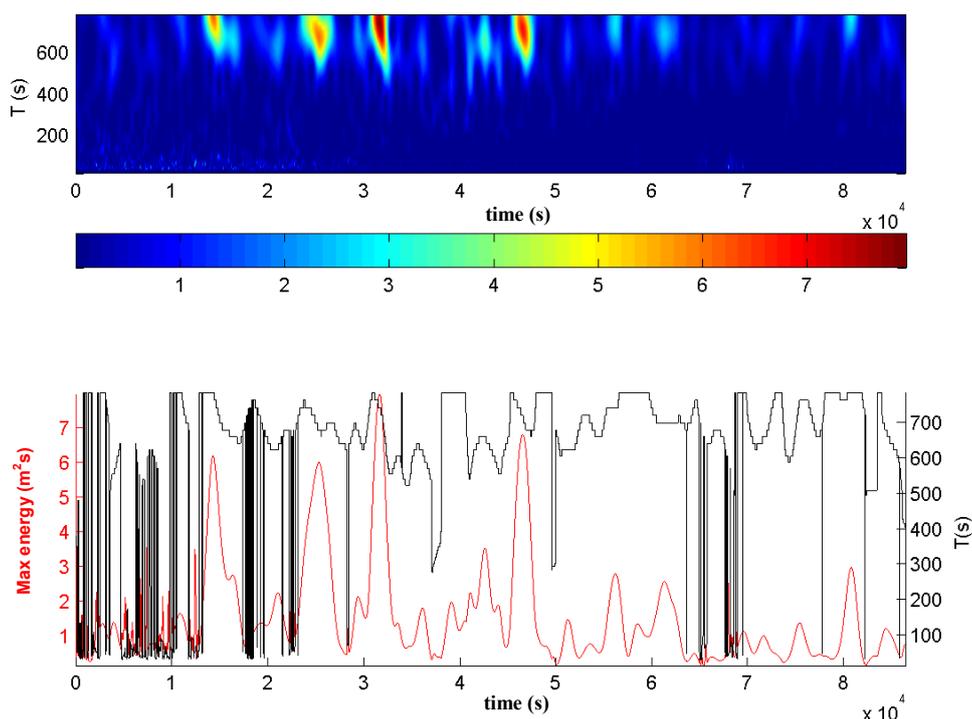


Figura 6 - Evolução temporal do espectro de energia (*wavelet*) de onda longa no dia 22 de outubro de 2011.

### ***Análise da adaptabilidade de modelos aos dados existentes***

De modo a procurar uma relação que permita relacionar as alturas de onda significativas e os períodos de pico de ondas curtas ao largo (medidas na boia ondógrafo fundeada ao largo de Sines, ou provenientes de previsões obtidas com modelos numéricos) e as características de ondas longas no interior da bacia do Terminal XXI, com base nos dados tri-horários destas grandezas, ajustou-se a relação entre altura de onda significativa de ondas longas ao largo ( $Hs_{OL}$ ) e a respetiva altura de onda significativa e período de pico de ondas curtas na bacia ( $Hs_{OC}$  e  $Tp_{OC}$ ). Na literatura (Hernandez, 2005) existe uma equação proposta para esta relação, dada por:

$$Hs_{OL} = K Hs_{OC}^{\alpha} Tp_{OC}^{\beta} \quad (1)$$

Esta equação foi ajustada com base em dados de diversos portos por diferentes autores, que obtiveram os valores que se apresentam no Quadro 2 (Hernandez, 2005). Neste ajuste são normalmente usados apenas os dados de ondas curtas ao largo relativos a estados de mar de vaga, designados na literatura anglo-saxónica por “swell”.

Quadro 2 – Valores de ajuste dos parâmetros da equação (1) para diferentes portos

<b>Autor</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
Vis (1985)	2	1.2
Nelson(1988)	1.77	1.77
Medina(1990)	2	0.5
Bowers (1992)	1.11	1.25
Gijón	1.402	0.66
Lastres	1.36	0.81

Para tentar ajustar uma equação semelhante aos dados existentes e estimar os valores dos três parâmetros empíricos,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $K$ , foi necessário calcular previamente os valores tri-horários de  $Hs_{OL}$  e  $Tp_{OL}$  com base nos dados medidos no marégrafo para o período entre abril de 2011 e junho de 2012. O cálculo foi feito analisando-se a energia contida entre as frequências 0.0013 Hz e 0.02 Hz, que correspondem a períodos entre 50 s e 770 s. Como não se dispunha de informação espectral que permitisse selecionar quais os dados associados a estados de mar de “swell” ao largo, optou-se, numa primeira fase, por selecionar apenas os dados (registos) correspondentes a  $Hs_{OC} > 3.5$  m. Essa seleção permitiu estabelecer uma amostra de dados tri-horários, de tamanho 58, que, embora, curta, já permite tirar algumas indicações válidas de eventual relação entre os parâmetros  $Hs_{OC}$  e  $Hs_{OL}$ .

Na Figura 7 apresentam-se os 58 valores tri-horários de  $Hs_{OL}$ , e respetivos  $Tp_{OL}$ , obtidos para o período em análise e para  $Hs_{OC} > 3.5$  m. Como se pode observar, os valores de períodos de pico obtidos localizam-se nas duas gamas anteriormente referidas: entre 144 s e 230 s e entre 415 s e 720 s.

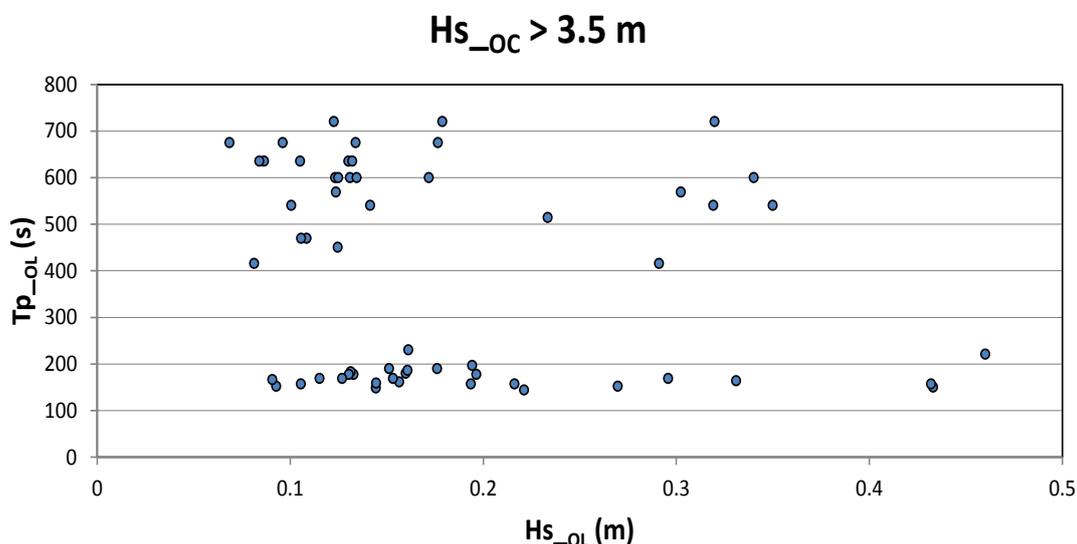


Figura 7 - Valores tri-horários de  $Hs_{OL}$  e respetivo  $Tp_{OL}$  para  $Hs_{oc} > 3.5$  m no período entre abril de 2011 e junho de 2012.

Na Figura 8 apresentam-se os histogramas respetivos de  $Hs_{OC}$  e  $Hs_{OL}$ , obtidos para o período em análise e para  $Hs_{OC} > 3.5$  m. É de notar a grande diferença das alturas de onda relativas a ondas curtas ao largo e relativas a ondas longas no Terminal XXI.

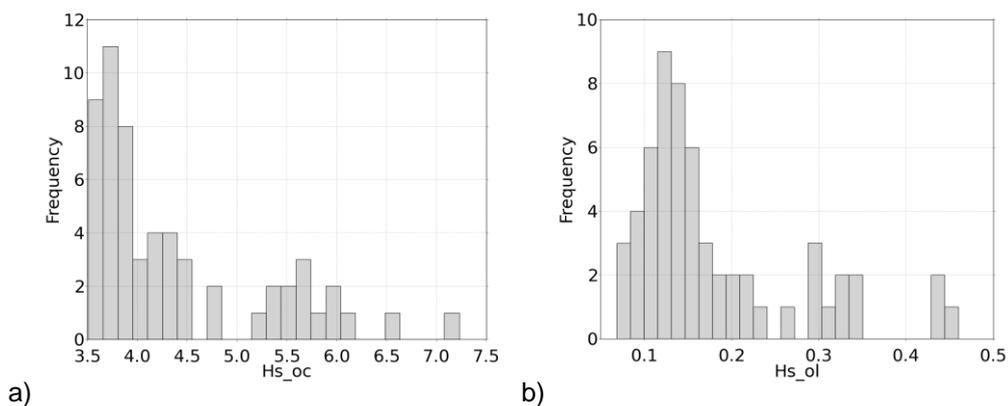


Figura 8 - Histogramas de a) Hs\_OC, b) Hs\_OL.

Para obtenção de eventual relação entre alturas de ondas curtas e longas procedeu-se ao ajuste dos dados, acima referidos, à equação (1), de modo a obter estimativas preliminares dos parâmetros dessa equação. Com base num ajuste 3D (*surface fitting*) dos dados à equação, obtiveram-se as seguintes estimativas dos coeficientes da equação:  $\alpha = 1.32$ ;  $\beta = 1.71$  e  $K = 0.0000288$ . Mostra-se na Figura 9 o gráfico de isolinhas da função HS\_OL correspondente.

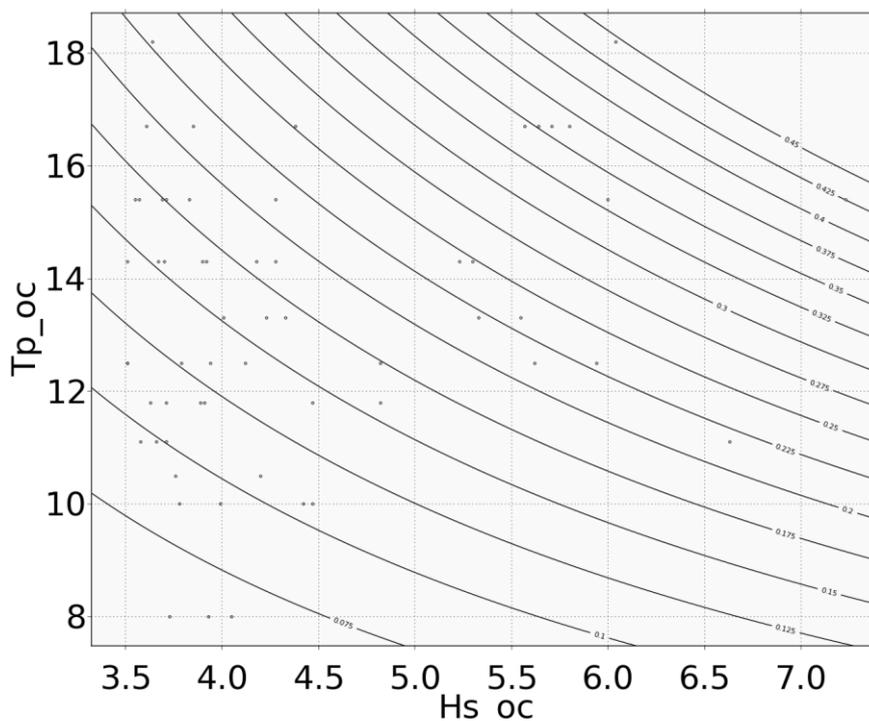


Figura 9 - Gráfico de isolinhas da função “Hs\_OL = 0.0000288. Hs\_OC1.32.Tp\_OC1.71”, para os dados do período entre 14 de maio e 10 de novembro de 2011, para Hs\_OC > 3.5 m.

Embora o número de dados (58) seja insuficiente para tirar conclusões definitivas, o ajuste obtido foi bom, com um coeficiente de correlação de 0.90 e um erro médio quadrático (RMSE) de apenas 0.041. Por outro lado, os valores de  $\alpha$  (alfa) e  $\beta$  (beta) estimados por este modelo estão dentro dos valores propostos por outros autores (ver Quadro 2).

Esta análise é indicativa dado o pequeno tamanho da amostra e o facto de se ter considerado um método muito aproximado de seleção dos registos associados a condições ditas de “swell”. Quanto ao primeiro aspeto, e dado que o período analisado corresponde efetivamente a grandes períodos de acalmia da agitação marítima, embora esse não seja o comportamento

habitual da agitação naquele local em outros períodos, apenas com um maior tempo de recolha de dados se poderá aprofundar a análise realizada. No que respeita ao segundo aspeto, será conveniente ter indicação de quais os estados de mar que correspondem a “swell”, através da análise espectral dos dados da boia, o que se espera poder obter em breve, refinando e completando a análise efetuada neste trabalho.

Uma análise mais aprofundada dos dados recolhidos em dias com e sem registo de problemas operativos no Terminal XXI será crucial para se poder identificar as oscilações de longo período que afetam a bacia do Terminal XXI e tirar ilações sobre a sua origem e a forma de mitigar a sua influência nas operações no Terminal. Para tal, e como já foi referido, é necessário dispor-se de um maior período de recolha de dados e assegurar a manutenção das condições geométricas da bacia portuária, já que eventuais alterações podem modificar as suas características ressonantes.

## 4. Aplicação DREAMS

### *Introdução*

Nesta secção, estuda-se a resposta do porto à incidência de ondas longas. Para esse efeito, determinam-se as curvas de resposta em diferentes pontos no interior da bacia (evolução do coeficiente de amplificação em função do período de onda longa). Considerou-se a configuração do porto correspondente à configuração intermédia entre a configuração de Fevereiro de 2011 e a configuração final do porto, nomeadamente a configuração da Figura 3. Esta configuração é a que corresponde à solução para a qual foram efetuadas as medições referidas no anterior capítulo.

### *Aplicação do modelo*

Os procedimentos para a aplicação do modelo DREAMS são:

- Definição das características das ondas longas;
- Definição do domínio de cálculo e da correspondente malha de elementos finitos com o programa GMALHA, Pinheiro *et al.* (2006);
- Definição dos coeficientes de reflexão ao longo da fronteira do domínio em estudo, com base nas características dos vários troços em que se pode dividir essa fronteira e nas condições de agitação regular incidente;
- Cálculos de propagação de ondas para as condições de agitação regular incidente;
- Obtenção e análise dos resultados do modelo, que constam das curvas de resposta em diversos pontos e nas zonas previamente selecionadas do domínio em estudo;

Os cálculos com o modelo DREAMS foram efetuados para as seguintes condições de agitação regular: a) Períodos de onda,  $T$ , de 20 a 600 s com intervalo de 20 s; b) direções de onda à entrada do domínio de cálculo de SW (225°), WSW (247.5°) e W (270°); c) níveis de maré de +2.0 m (Z.H.) (nível médio) e +4.5 m (Z.H.) (nível de preia-mar de águas vivas).

O domínio computacional e a batimetria são os mostrados na Figura 10.

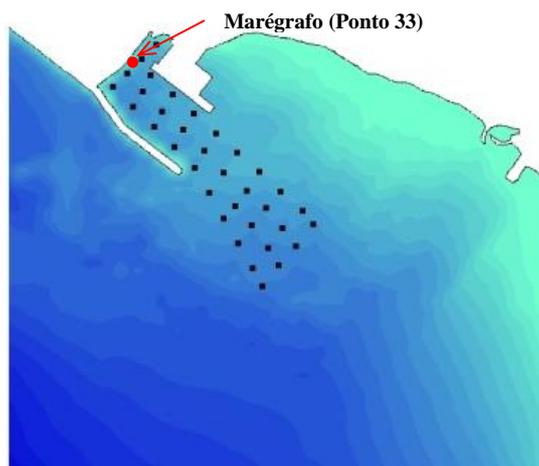


Figura 10 – Batimetria e domínio de cálculo do DREAMS. Pontos de cálculo das curvas de resposta.

O domínio de cálculo foi discretizado com uma malha de 172 329 nós e 342 599 elementos. O espaçamento em x e em y variou ao longo do domínio, tendo em conta a profundidade local, de forma a garantir uma média de 55 pontos de malha por comprimento de onda, considerando uma onda incidente de 20 s de período. Notar que quanto maior o período maior o comprimento de onda, e, conseqüentemente, maior o número de pontos por comprimento de onda. Assim, para os restantes períodos o comprimento de onda é sempre superior a 55.

Os coeficientes de reflexão em todas as fronteiras foram considerados constantes e iguais a 1, uma vez que para a gama de períodos testada todas as fronteiras atuam como completamente refletoras.

## Resultados

Para as condições atrás referidas, efetuaram-se cálculos sistemáticos de ondas regulares com o modelo DREAMS. Os resultados consistiram nos diagramas da variação dos coeficientes de amplificação na totalidade do domínio em estudo, para as direções de W, WSW e SW, para os distintos níveis de maré de +2.0 m e +4.5 m (ZH) e para os diferentes períodos testados. Obtiveram-se também curvas de resposta ( $H/H_0$ , que representam a variação do coeficiente de amplificação com o período da onda) em diversos pontos de controlo, mais concretamente no ponto 33, que corresponde à localização do marégrafo.

Assim, a Figura 11 mostra as curvas de resposta no ponto do marégrafo (ponto 33) para os níveis de maré médio (+2.0 m ZH) e de preia-mar (+4.5 m ZH).

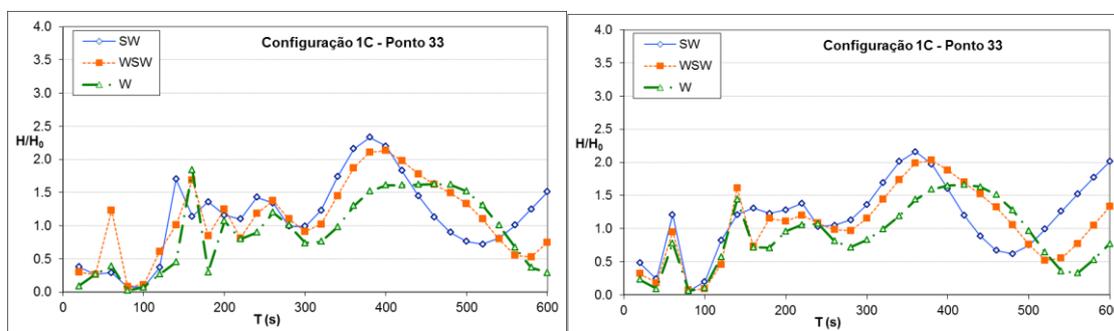


Figura 11 – Curvas de resposta para os níveis de maré médio (+2.0 m ZH) e de preia-mar (+4.5 m ZH) na posição do marégrafo (ponto 33).

Como exemplo, a Figura 12 mostra os diagramas do coeficiente de amplificação para SW (135°), correspondentes aos períodos de 80, 100, 380 e 480 s.

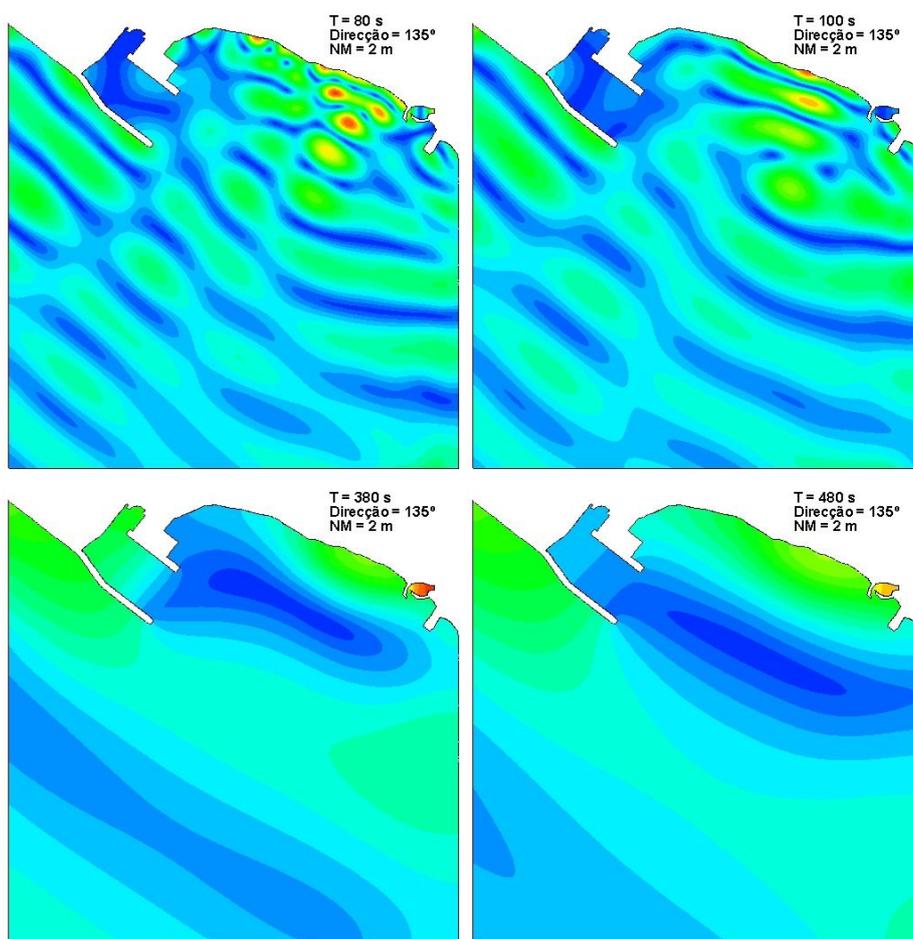


Figura 12 – Coeficiente de amplificação para os períodos de onda de 80 s, 100 s, 380 s e 480 s.

Em geral, a ressonância ocorre para três intervalos de períodos: 140-160 s, 240-260 s e 340-420 s, no caso do nível de maré de (+2.0 m ZH), dependendo da direcção da onda. Para o nível da maré (+4.5 m ZH), o número de intervalos de situações associadas a ressonância é mais baixo, ou seja, apenas duas gamas: 140-160 e 240-260 s. Em todas as configurações, há casos de condições de ressonância associados com períodos maiores do que 600 s, para ambos os níveis de maré testados.

Para várias condições de ressonância, a área associada com os valores mais elevados do coeficiente de amplificação é a área da bacia do porto interior do Terminal XXI. Embora os valores do coeficiente de amplificação não excedam os 4.0 para qualquer das condições de onda incidente e os níveis de maré testadas, as velocidades correspondentes são significativas, especialmente ao longo das áreas de cais. Essas velocidades podem causar problemas para os navios atracados no local (como é reportado pelos utilizadores do porto).

## 5. Comparação entre medições e cálculos numéricos

Faz-se, nesta secção, a comparação entre os resultados numéricos e os dados medidos pelo marégrafo para os dias em que houve registos de problemas de ressonância no Terminal XXI. O objetivo principal é identificar os períodos de ondas ressonantes na bacia com o modelo numérico e compará-los com os períodos de medição associados a problemas (navios em

movimento ou rotura de cabos de amarração), permitindo deste modo avaliar o desempenho do modelo numérico.

Entre outubro de 23 e 4 de novembro de 2011 identificaram-se vários problemas na bacia. Nesse período, com base em dados medidos dentro da bacia, foram identificadas três gamas de períodos de pico de ondas longas,  $Tp_{OL}$ , associados a condições mais energéticas ( $30\text{ s} < Tp_{OL} < 100\text{ s}$ ,  $100\text{ s} < Tp_{OL} < 250\text{ s}$ ,  $250\text{ s} < Tp_{OL} < 350\text{ s}$ ), potencialmente geradoras de problemas nos navios amarrados na bacia portuária em análise. Para  $Tp_{OL}$  superiores a 350 s a linha nodal já não cruza a zona de estacionamento de navios e, por isso, não foi considerada, por não ser potencialmente geradora de problemas.

Apresentam-se no Quadro 3 os períodos de pico obtidos para cada uma das três gamas de períodos referidas anteriormente para os dias em que houve problemas no Terminal XXI: dias 23 a 25 e 27 a 31 de outubro e 3 e 4 de novembro de 2011. Como se pode verificar, os valores obtidos de  $Tp_{OL}$  correspondem a valores compreendidos entre 62 e 69 s, entre 145 e 200 s e entre 270 e 334 s.

Quadro 3 – Períodos de pico medidos no marégrafo instalado no Terminal XXI nos dias 23 a 25 e 27 a 31 de outubro e 3 e 4 de novembro de 2011.

Data	Observação	Tp (s)		
		30s < Tp <sub>OL</sub> < 100 s	100 s < Tp <sub>OL</sub> < 250 s	250 s < Tp <sub>OL</sub> < 350 s
23-Out	Navio a mexer	62	159	300
24-Out	Temporal e navio a mexer	63	145	327
25-Out	Navio a mexer	62	149	270
27-Out	Temporal e navio a mexer	69	153	286
28-Out	Navio a mexer	64	163	334
29-Out	Navio a mexer	63	200	281
30-Out	Navio a mexer e cabos partidos	62	158	284
31-Out	Cabos partidos	63	200	281
3-Nov	Temporal e cabos partidos	67	159	301
4-Nov	Temporal e cabos partidos	64	159	288

Para cada uma dessas gamas, foram efetuados cálculos suplementares, mais detalhados, com o modelo DREAMS, para períodos que englobam os apresentados no Quadro 3 e que correspondem a valores entre 50 s a 72 s, entre 140 s e 200 s e entre 270 s e 340 s, com um passo de 2 segundos, para o nível de maré de 2.0 m (Z.H.).

Na Figura 13 apresentam-se, a título de exemplo, dois dos diagramas de coeficientes de amplificação obtidos para  $T = 62\text{ s}$  e  $160\text{ s}$  e direção de W ( $180^\circ$ ). Para ambos os períodos, é facilmente identificável um nó junto ao cais.

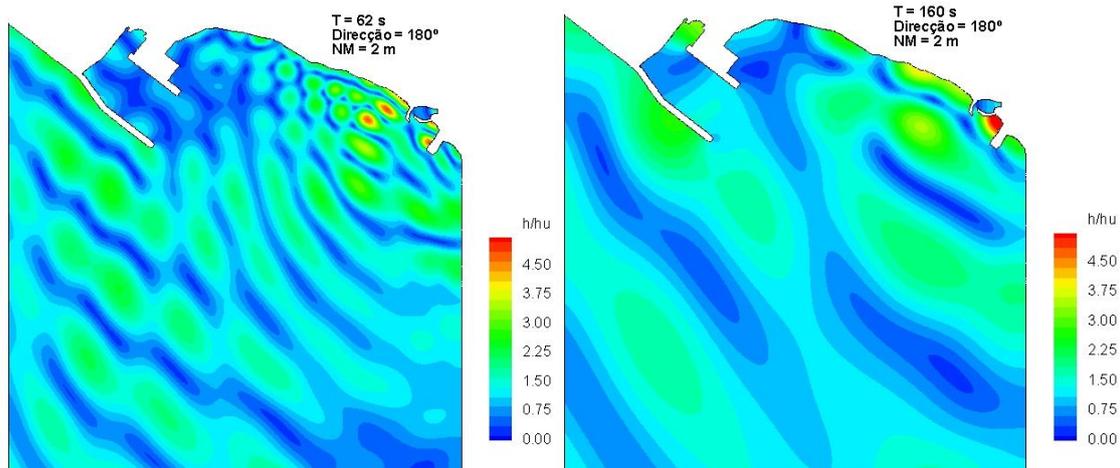


Figura 13 – Coeficiente de amplificação da onda para T=62 s e 160 s e nível de maré, de 2.0 m (Z.H.).

Na Figura 14 apresentam-se os períodos para os quais se obteve, no ponto 33, a maior amplificação ressonante na bacia, para o nível de maré de 2.0 m (Z.H.). Os resultados são ainda comparados com os valores dos períodos de pico de ondas longas medidos no marégrafo entre 23 de outubro e 4 de novembro de 2011, apresentados no Quadro 3.

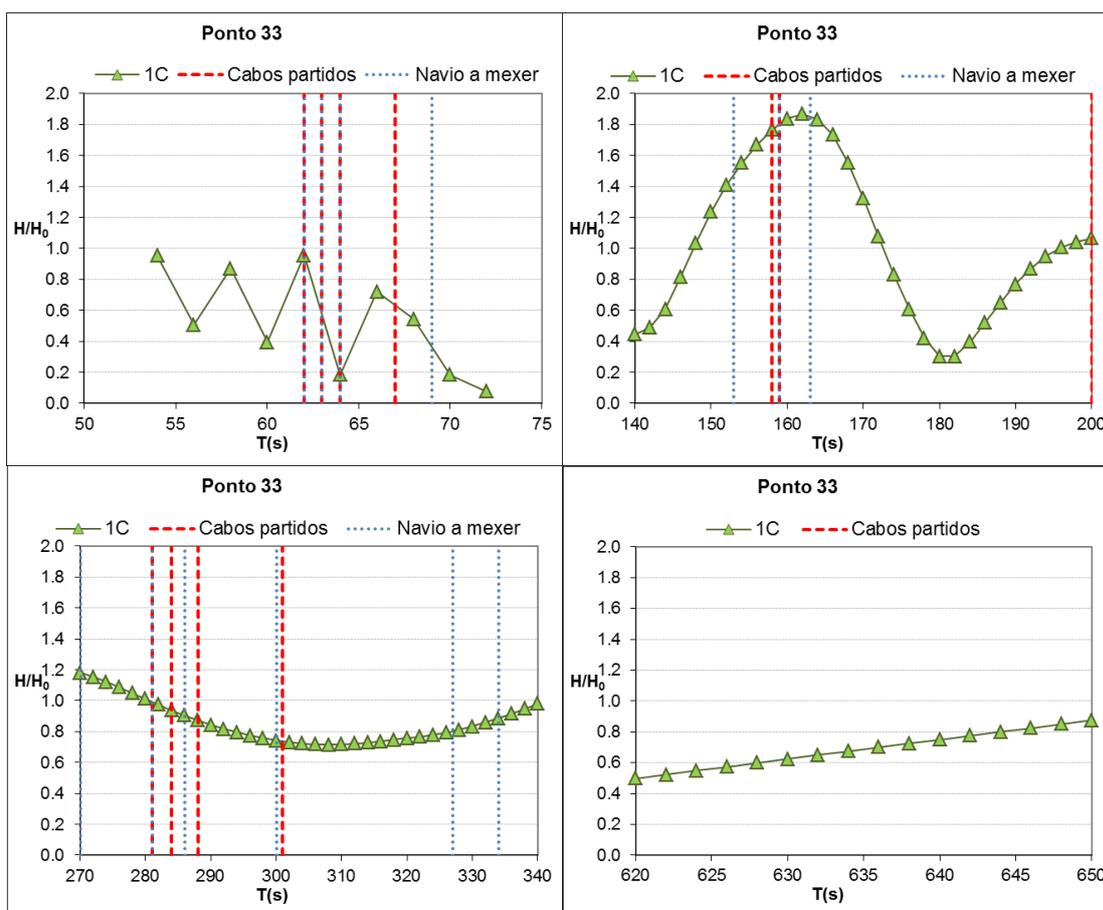


Figura 14 - Coeficientes de amplificação na posição do marégrafo (ponto 33). Nível de maré 2.0 m (Z.H.)

O modelo conduz a maiores valores de amplificação para a gama entre 140 s e 200 s, especialmente para os períodos entre 150 s a 160 s, valores para os quais estava associada, em geral, a maior energia nas medições efetuadas. Para as outras gamas de períodos, geralmente menos energéticas, não se verifica amplificação da amplitude da onda.

Verifica-se contudo que, nos dias em análise, os períodos medidos no marégrafo aquando da ocorrência de problemas de cabos partidos nos navios coincidem, na generalidade, com os períodos de ressonância obtidos pelo modelo numérico, o que permite concluir que o modelo está a reproduzir adequadamente o fenómeno.

## 6. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, descreveu-se a análise das ondas de longo período medidas no interior da bacia portuária do Terminal XXI com um marégrafo e o estudo em modelo numérico das características de ressonância dessa bacia, com vista a melhor compreender os fenómenos de ressonância que se têm verificado na bacia do Terminal XXI.

Com base nos dados medidos por um marégrafo instalado na bacia do Terminal XXI, entre abril de 2011 e junho de 2012, e nos dados medidos por uma boia ondógrafo direcional, localizada ao largo de Sines, procedeu-se a uma primeira e breve análise das possíveis condições de ressonância e uma análise mais aprofundada da evolução temporal do espetro no interior da bacia, utilizando *wavelets*.

Encontrou-se, por outro lado, uma equação que relaciona as alturas significativas das ondas longas (HS\_ OL) com as alturas significativas e períodos de pico das ondas curtas (OC HS\_ e Tp\_ OC) no interior da bacia do terminal XXI. Embora o número de dados (58) utilizados nesta análise possa ser considerado insuficiente para tirar conclusões fiáveis, o ajuste obtido foi razoavelmente bom, obtendo-se um coeficiente de correlação de 0.90 e um erro médio quadrático (RMSE) de apenas 0.041. O interesse prático desta relação pode, contudo, ser mais proeminente se se aumentar o período de análise, de modo a permitir melhor ajuste da função à amostra. A dita análise deve ser portanto complementada quer com mais dados medidos, quer considerando um maior número de situações problemáticas, e para uma configuração estável da bacia.

Os cálculos sistemáticos de ressonância obtidos com o modelo numérico DREAMS mostraram que, em geral, ocorrem situações de ressonância em 3 gamas (períodos nas gamas de 140 s a 160 s, de 240 a 260 s e de 340 s a 420 s). No nível de maré de +4.5 m (Z.H.), o número de gamas associado a situações de ressonância é inferior. Existem situações de ressonância associada a períodos superiores a 600 s para quaisquer dos níveis de maré. A zona mais interior da bacia portuária do Terminal XXI, onde se encontra o marégrafo, é a que apresenta maiores amplificações ressonantes. Embora os valores de amplificação não sejam superiores a 4.0, para qualquer das condições testadas, as velocidades associadas são significativas, especialmente ao longo da zona do cais de acostagem e na zona entrada do porto interior, o que pode causar problemas aos navios aí amarrados. É de referir ainda que a zona nodal ao longo do cais de acostagem se situa mais próximo da entrada do porto interior no caso dos menores períodos e se afasta dessa zona para os períodos superiores, compreendidos entre 240 s e 260 s e entre 340 e 400 s.

Finalmente, ao estudar-se as ocorrências de rotura de cabos e de movimentos horizontais de navios atracados (observados pela PSA, desde fevereiro de 2011), nos dias analisados (entre 24 de outubro e 3 de novembro de 2011), pode observar-se uma relação entre os períodos de ressonância obtidos pelo modelo numérico para a configuração testada (que é o mais próximo da situação em que as medições foram realizadas), e os períodos de maior energia medida pelo marégrafo. Isto mostra que o modelo é capaz de reproduzir de forma adequada o fenómeno.

Esta análise deverá ser complementada com o estudo da transformação das ondas do largo para o interior do Terminal XXI, para os dias com problemas assinalados. Em especial, pretende-se transferir algumas condições das ondas medidas pela boia ao largo de Sines, utilizando dois modelos numéricos acoplados (SWAN, Booij *et al.*, 1999, e DREAMS) para: a) a bacia interior do Terminal XXI, onde há dados de marégrafo, e b) para a posição ocupada por um equipamento ADCP, junto a S. Torpes. Essa análise deverá permitir uma melhor validação dos modelos numéricos referidos.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se à CONDURIL e ao Porto de Sines, pela autorização concedida para a utilização dos dados de base e resultados do estudo Fortes *et al.* (2012) e Neves *et al.* (2013).

## REFERÊNCIAS

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geoph. Research*, 104, C4, 7649-7666.

Fortes, C.J.E.M. (1993) “Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas. Análise pelo método dos elementos finitos”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico.

Fortes, C.J.E.M., Pinheiro, L.V., Neves, M.G., Capitão, R. (2012). Estudo de ressonância da bacia portuária do Terminal XXI. Relatório de progresso. Relatório 98/2012, DHA/NPE, LNEC, Abril.

Hernández, G.D. (2005). Análisis de resonancia portuaria: generación, transitoriedad, no linealidad y acoplamiento geométrico., Ph.D thesis, Universidad de Cantabria, Espanha.

Neves, M.G., Pinheiro, L.V., Capitão, R., Fortes, C.J.E.M. (2013). Estudo da ressonância da bacia portuária do Terminal XXI. 2º Relatório de progresso. Relatório 24/2013, DHA/NPE, LNEC, janeiro.